

## ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП ТЕХНОЛОГИИ C-OFDM Горьковский К.А.

*Горьковский Кирилл Андреевич – студент магистратуры,  
кафедра средств связи и информационной безопасности,  
Омский государственный технический университет, г. Омск*

**Аннотация:** в статье рассматривается технология ортогонального частотного разделения каналов с кодированием C-OFDM. Описание технологии C-OFDM включает в себя: описание технологии OFDM, описание методов помехозащищенности OFDM-сигналов, обоснование применения техники прямой коррекции ошибок для увеличения показателей помехоустойчивости в технологии C-OFDM.

**Ключевые слова:** C-OFDM, OFDM, помехоустойчивость, циклический префикс, Фурье, FFT, многолучевое распространение.

Технология ортогонального частотного разделения каналов с кодированием (C-OFDM) нашла применение в стандарте цифровой передачи аудио-сигналов DAB и в стандарте цифрового телевидения DVB-T. Устойчивость к последствиям многолучевого распространения (при условии использования подходящего защитного интервала) – это то достоинство технологии C-OFDM, благодаря которому вышеупомянутые стандарты отвечают современным требованиям к качеству радиовещания. Эта устойчивость проявляется не только при «естественном» многолучевом распространении. Технологию C-OFDM с успехом можно использовать в так называемых одночастотных сетях SFN, в которых все излучатели передают один и тот же сигнал, на одинаковых частотах. В таких сетях на вход приёмного устройства с разными задержками поступают одинаковые сигналы от разных источников, и, в таком случае, наблюдается «искусственное» многолучевое распространение [1, 14].

Другим преимуществом технологии C-OFDM является высокая помехоустойчивость к узкополосным помехам. Кстати говоря, такими помехами для C-OFDM-сигналов являются обычные аналоговые телевизионные сигналы стандартов NTSC, PAL, SECAM [1, 15].

Главным отличием технологии C-OFDM от OFDM является способность к восстановлению утраченных или искаженных данных при приеме благодаря использованию техники прямой коррекции ошибок.

В технологии OFDM высокоскоростной поток данных разбивается на множество низкоскоростных потоков (обычно больше тысячи), которые передаются одновременно, каждый на своей частоте. Благодаря уменьшению скорости, длительность символа в каждой поднесущей увеличивается и становится значительно больше задержки распространения, что делает OFDM намного устойчивей к межсимвольной интерференции [2, 51].

В технологии частотного мультиплексирования FDM поднесущие отделялись друг от друга довольно большим защитным интервалом для того, чтобы спектральные составляющие одной поднесущей не перекрывались со спектральными составляющими другой. В технологии OFDM для увеличения спектральной эффективности используют ортогональные поднесущие. Это означает, что для оптимального приёма необходимо, чтобы расстояние между поднесущими было равным  $1/\text{длительность символа}$  [2, 51].

Для более эффективной защиты от межсимвольных помех и помех между поднесущими, длительность символа OFDM-сигнала увеличивается путем добавления защитного интервала, при условии, что величина защитного интервала должна быть больше задержки эхосигналов на входе приемника. В качестве защитного интервала могут использоваться нули, добавленные в начало каждого символа, что также позволяет более точно выделять такты при приёме. Большим недостатком такого защитного интервала являются тяжелые условия работы передатчика в импульсном режиме. Поэтому в качестве защитного интервала используют циклический префикс – избыточную информацию, представляющую собой копию окончания символа. На рисунке 1 приведен пример добавления циклического префикса к OFDM-символам.

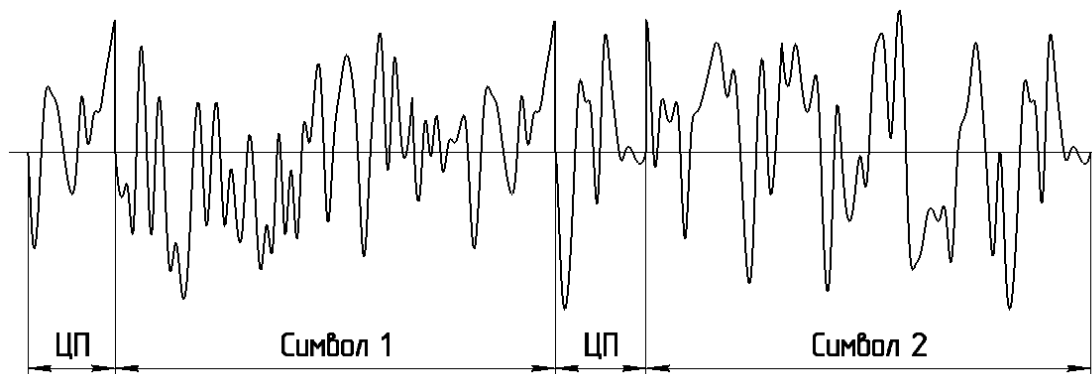


Рис. 1. Пример добавления циклического префикса

Добавление защитного интервала существенно уменьшает объём передаваемой «полезной» информации, поэтому выбор его длительности является компромиссом между скоростью передачи данных и их сохранностью. К примеру, в стандартах DAB и DVB-T защитный интервал не превышает  $\frac{1}{4}$  длительности символа, но защищает сигнал от воздействия межсимвольной интерференции при максимальной задержке эхосигналов порядка 200 мкс (в зависимости от выбранного режима работы системы).

Разумеется, передача одного сигнала на тысяче поднесущих, их модуляция и демодуляция – задача непосильная как для передатчика, так и для приёмника. К счастью одновременная модуляция и демодуляция большого количества поднесущих эквивалентна операциям дискретного преобразования Фурье, для которых существуют эффективные алгоритмы быстрого преобразования Фурье (FFT и IFFT).

В условиях многолучевого распространения, сигнал, передаваемый на некоторых поднесущих, усиливается, а на других ослабляется. По этой причине часть передаваемой информации принимается в хорошем качестве, а другая часть вообще может быть утрачена. Это связано с влиянием частотно-селективных замираний на OFDM-сигнал [3, 36].

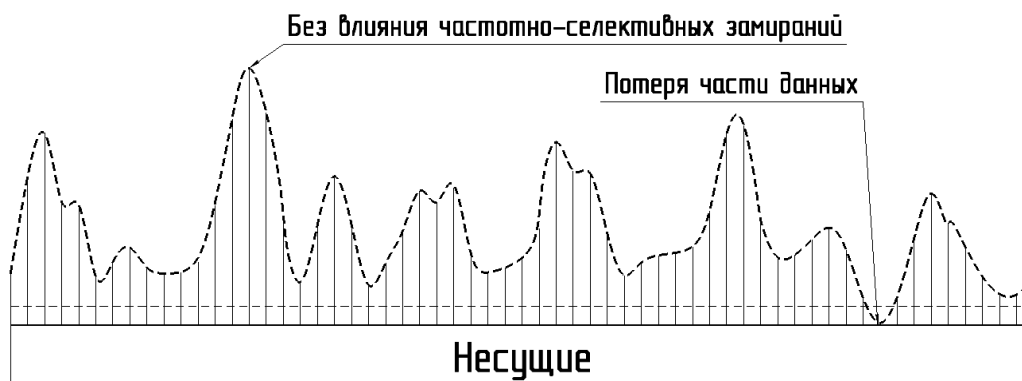


Рис. 2. Влияние частотно-селективных замираний на OFDM сигнал

Однако, если совместно с «полезной» информацией передавать избыточную, с помощью которой приемник мог бы восстановить утраченные или искаженные данные, частотно-селективные замирания уже не оказывали бы серьезного влияния на качество связи. Именно добавление такой избыточной «корректирующей» информации обеспечивает техника прямой коррекции ошибок FEC в технологии C-OFDM, включающая в себя использование сверточного кодера и сверточного декодера Витерби.

Таким образом, в сравнении с OFDM, технология C-OFDM обладает наилучшей помехоустойчивостью, но уступает в скорости передачи данных, по причине увеличения объема передаваемой информации.

### Список литературы

1. Локшин Б.А. Сравнение видов модуляции в наземном цифровом вещании // Теле-Спутник: журнал. 2001. № 3 (65).
2. Лебедев В. Модуляция OFDM в радиосвязи // Радиолюбитель, 2008. № 9.
3. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия - Телеком, 2015. 360 с. ISBN 978-5-9912-0549-8.